



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Permeameterforsøg Falling Head

Nielsen, Benjaminn Nordahl; Nielsen, Søren Dam

Publication date:
2019

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Nielsen, B. N., & Nielsen, S. D. (2019). *Permeameterforsøg Falling Head*. Aalborg Universitet, Institut for Byggeri og Anlæg. DCE Lecture notes Nr. 56

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



INSTITUT FOR BYGGERI OG ANLÆG
AALBORG UNIVERSITET

Permeameterforsøg Falling Head

**Benjaminn Nordahl Nielsen
Søren Dam Nielsen**

Aalborg Universitet
Institut for Byggeri og Anlæg
Sektionen for byggeri og infrastruktur

DCE Lecture Notes No. 56

Permeameterforsøg Falling Head

Benjamin Nordahl Nielsen
Søren Dam Nielsen

2019

© Aalborg Universitet

Videnskabelige publikationer ved Institut for Byggeri og Anlæg

Technical Reports anvendes til endelig afrapportering af forskningsresultater og videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg på Aalborg Universitet. Serien giver mulighed for at fremlægge teori, forsøgsbeskrivelser og resultater i fuldstændig og uforkortet form, hvilket ofte ikke tillades i videnskabelige tidsskrifter.

Technical Memoranda udarbejdes til præliminær udgivelse af videnskabeligt arbejde udført af ansatte ved Institut for Byggeri og Anlæg, hvor det skønnes passende. Dokumenter af denne type kan være ufuldstændige, midlertidige versioner eller dele af et større arbejde. Dette skal holdes in mente, når publikationer i serien refereres.

Contract Reports benyttes til afrapportering af rekvireret videnskabeligt arbejde. Denne type publikationer rummer fortroligt materiale, som kun vil være tilgængeligt for rekvirenten og Institut for Byggeri og Anlæg. Derfor vil Contract Reports sædvanligvis ikke blive udgivet offentligt.

Lecture Notes indeholder undervisningsmateriale udarbejdet af undervisere ansat ved Institut for Byggeri og Anlæg. Dette kan være kursusnoter, lærebøger, opgavekompendier, forsøgsmanualer eller vejledninger til computerprogrammer udviklet ved Institut for Byggeri og Anlæg.

Theses er monografier eller artikelsamlinger publiceret til afrapportering af videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg som led i opnåelsen af en ph.d.- eller doktorgrad. Afhandlingerne er offentligt tilgængelige efter succesfuldt forsvar af den akademiske grad.

Latest News rummer nyheder om det videnskabelige arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg med henblik på at skabe dialog, information og kontakt om igangværende forskning. Dette inkluderer status af forskningsprojekter, udvikling i laboratorier, information om samarbejde og nyeste forskningsresultater.

Udgivet 2019 af
Aalborg Universitet
Institut for Byggeri og Anlæg
Thomas Manns Vej 23
DK-9220 Aalborg Ø, Danmark

Trykt i Aalborg på Aalborg Universitet

ISSN 1901-7286
DCE Lecture Notes No. 56

Udgivelser i DCE Lecture Note serien

Nielsen, B.N. og Nielsen, S.D. 2019, Beregningsmetodik for forankret spunsvæg uden flydecharnier, DCE Lecture note no. 45, Aalborg Universitet, Institut for byggeri og anlæg, Aalborg.

Nielsen, B.N. og Nielsen, S.D. 2019, Beregningsmetodik for forankret spunsvæg med et flydecharnier, DCE Lecture note no. 46, Aalborg Universitet, Institut for byggeri og anlæg, Aalborg.

Forord

Denne vejledning beskriver udførelse af strømningsforsøg med faldende trykniveau (Falling Head) som det foretages i Laboratoriet for Fundering ved Aalborg Universitet.

Vejledningen omfatter en beskrivelse af teorien bag forsøget, forsøgsproceduren og den tilhørende beregning af den hydrauliske ledningsevne og permeabilitet.

Under bemærkninger er anført væsentlige forhold, som kan betyde betydning for analyseresultaterne, men som ikke er beskrevet i selve forsøgsproceduren.

Med vejledningen følger skemaer til brug for forsøget samt en beskrivelse af forsøgsudstyret som det forefindes i Laboratoriet for Fundering ved Aalborg Universitet.

Det anbefales brugeren af denne vejledning at læse hele vejledningen igennem inden forsøg påbegyndes.

Enheder er angivet med [], f.eks. [%].

Vandprocenten i sandprøven skal være 3 – 4 % ellers kan prøven ikke vandmættes ordenligt.

Indholdsfortegnelse

Forord	6
Baggrund og formål	9
Teorien bag.....	9
Anvendt teori.....	10
Permeameterapparat (Falling Head)	13
Opbygning af permeameterapparatet.....	14
Styringstavle	15
Ventiltavle.....	16
Standrør og trykniveaumåler.....	17
Overløbsanordning	18
Valg af permeameter	19
Valg af filtersten.....	20
Valg af fjeder.....	21
Valg af standrør	22
Forsøgsprocedure	24
Klargøring	24
Klargøring af lille vandbeholder.....	24
Klargøring af stor vandbeholder	25
Klargøring af jordprøve og permeameter.....	26
Klargøring af forsøgsopstilling	29
Måleprocedure	33
Måling af poretal	36
Måling af effektiv porøsitet	36
Afslutning af forsøg.....	37
Bemærkninger	37

Fejlkilder	37
Resultatbehandling	38
Målte data	38
Beregninger	38
Vurdering af resultater	40
Afreportering	41
Strømningsforsøg – skema.....	42
Bilag – Grænsetilfælde	44
Magasinering af vand i jordprøven	44
Turbulens strømning.....	45
Bilag - Korrektionsfaktorer for permeameter	46
Bilag - Korrektionsfaktor for standrør.....	48
Referencer	51

Baggrund og formål

Strømningsforsøgets formål er at bestemme en jordprøves hydrauliske ledningsevne, k_T , samt permeabilitet, K . Strømningsforsøget udføres med faldende trykniveau (Falling Head).

Teorien bag

I en vandmættet jord gælder Darcys lov for en stationær laminær strømning, hvor filterhastigheden antages at være den samme størrelse og retning i ethvert punkt. Darcys lov er givet ved:

$$Q = k_T \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{L},$$

hvor

Q er vandflowet [m^3/s]

k_T er den hydrauliske ledningsevne ved temperaturen T [m/s]

A er jordprøvens tværsnitsareal [m^2]

L er jordprøvens længde [m]

Δh er forskellen i trykniveau [m]

I ovenstående formel sammenblandes jordens egenskaber og egenskaberne ved den væske, der gennemstrømmer jorden. Dette tages der højde for, ved at indføre væskens rumvægt og dynamiske viskositet sammen med forskellen i trykniveau:

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\gamma_w}{\eta_T} \cdot \frac{\Delta h}{L} \quad \text{eller} \quad k_T = K \cdot \frac{\gamma_w}{\eta_T}$$

hvor

γ_w er vands rumvægt [kN/m^3]

η_T er vands dynamiske viskositet til temperaturen T [$\text{kN} \cdot \text{s}/\text{m}^2$]

K er permeabiliteten [m^2]

Idet $\frac{\gamma_w}{\eta_T} = \frac{g}{\nu_T}$ angives den hydrauliske ledningsevne i stedet som:

$$k_T = K \cdot \frac{g}{\nu_T}$$

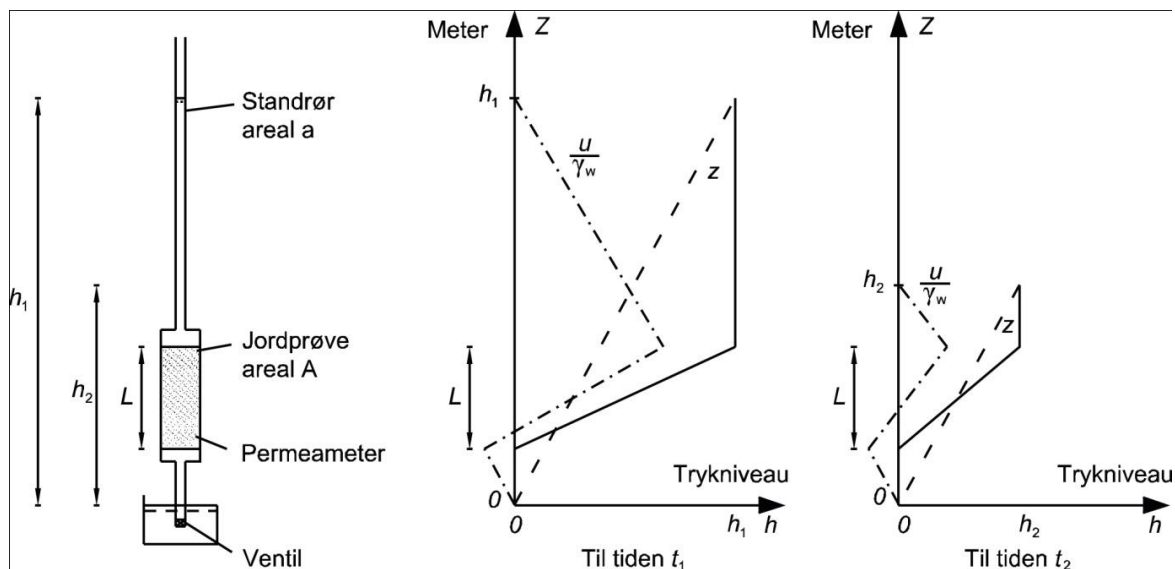
hvor

g er tyngdeaccelerationen svarende til $\approx 9,816$ [m/s^2]

ν_T er vands kinematiske viskositet til temperaturen T [m^2/s]

Anvendt teori

Den hydrauliske ledningsevne samt permeabiliteten bestemmes ud fra strømningsforsøg med faldende trykniveau. Overordnet består forsøget af en jordprøve, standrør og overløbsanordning. En skitse af forsøgsopstillingen kan ses på Figur 0.1.



Figur 0.1. Strømningsforsøg med faldende trykniveau.

Vandspejlet i den nederste beholder holdes konstant ved hjælp af en overløbsordning, og forsøget påbegyndes når ventilen under permeametre åbnes, hvormed vandspejlet i standrøret falder og der foregår en parallelstrømning i jordprøven. Til tiden t_1 og t_2 er trykniveauhøjden hhv. h_1 og h_2 .

Strømningen under forsøget forudsættes quasi-stationær. En quasi-stationær strømning er en ikke-stationær strømning, hvor kontinuitetsligningen og Darcys lov dog med god tilnærmelse kan anvendes, se referencer. Ofte skrives Darcys lov som:

$$v = k_T \cdot i$$

hvor

$$v = \frac{Q}{A} \text{ er filterhastigheden [m/s]}$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} \text{ kaldes gradienten [-]}$$

Til tiden t er kontinuitetsligningen givet ved:

$$-\frac{dh}{dt} \cdot a = A \cdot v$$

hvor a er standrørets tværsnitsareal [m^2]

Ved løsning af differentialligningen med randbetingelsen $h = h_1$ for $t = 0$ findes:

$$\ln(h) = -\frac{A}{a} \cdot \frac{k_T}{L} \cdot t + \ln(h_1) \quad \text{eller} \quad k_T = \frac{a}{A} \cdot \frac{L}{t} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h}\right)$$

Ved udførelse af strømningsforsøget er det relevant, at kende trykniveauhøjden ved $\frac{1}{2} t_2$, idet $t_1 = 0$.

Af ovenstående findes:

$$h = \sqrt{h_1 \cdot h_2} \quad , \text{ når } t = \frac{1}{2} t_2.$$

Strømningsforsøget kan udføres på prøver af sand, silt og ler. Forudsætningen om hhv. kontinuitetsligning og Darcys lov kontrolleres. Beskrivelsen af dette kan ses i bilag 0.

Permeameterapparat (Falling Head)

Det anvendte permeameterapparat er af typen Falling Head. Permeameterapparatet er placeret i Laboratoriet for Fundering ved Aalborg Universitet. Permeameterapparatet kan ses på *Figur 0.2*.



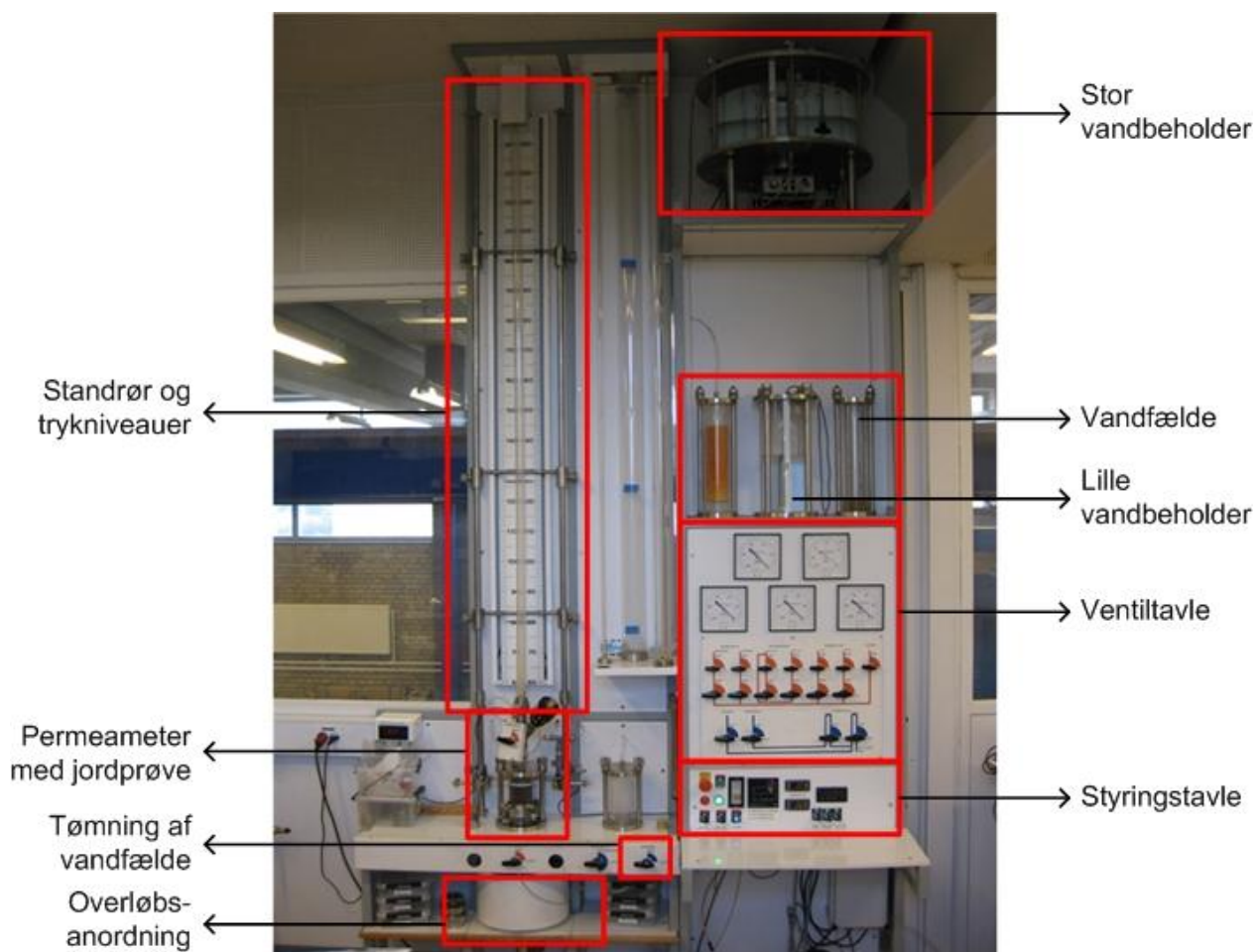
Figur 0.2: Permeameterapparat.

Strømningsforsøg kan udføres på prøver af sand, silt og ler. Prøverne kan enten være tildannede intakte rørprøver eller prøver indbygget ved forskellig lejringstæthed. Indbygningen kan f.eks. foretages som for løs- og fastlejring af sand. Ved indbygning af lejrings skal vandindholdet være 3 – 4% for at prøven kan vandmættes helt.

Opbygning af permeameterapparatet

Permeameterapparatet består overordnet set af

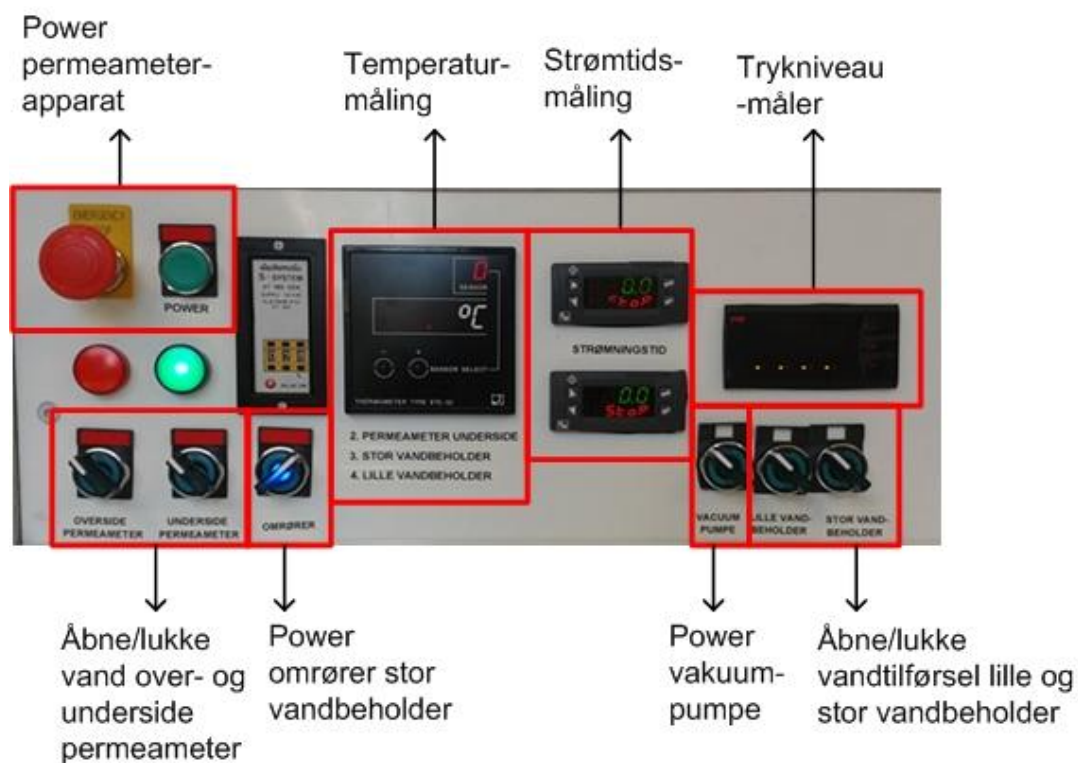
- Permeameter med tilhørende jordprøve
- Styringstavle
- Ventiltavle
- Standrør
- Trykniveaumåler
- Overløbsanordning
- Lille og stor vandbeholder



Figur 0.3: Permeameterapparat med tilhørende betegnelser.

Styringstavle

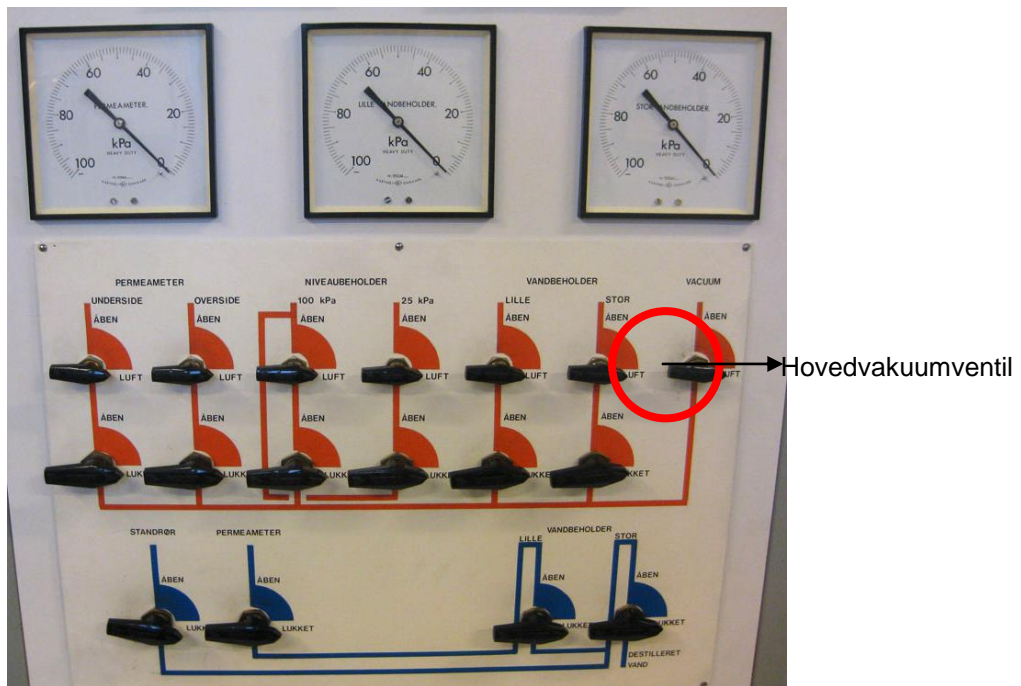
På styringstavlen tændes og slukkes selve apparatet og vakuumpumpen. Der er installeret åbne- og lukkemekanismer for gennemløb af vand på oversiden og undersiden af permeameteret, samt for vandførsel til stor og lille vandbeholder. Desuden er der her måleinstrumenter for temperatur og strømningstid, se Figur 4.3.



Figur 0.4: Styringstavle med tilhørende forklaringer.

Ventiltavle

Over styringstavlen sidder ventiltavlen, hvor det er muligt at åbne- og lukke for vakuum- og vandventiler, se *Figur 0.5*.

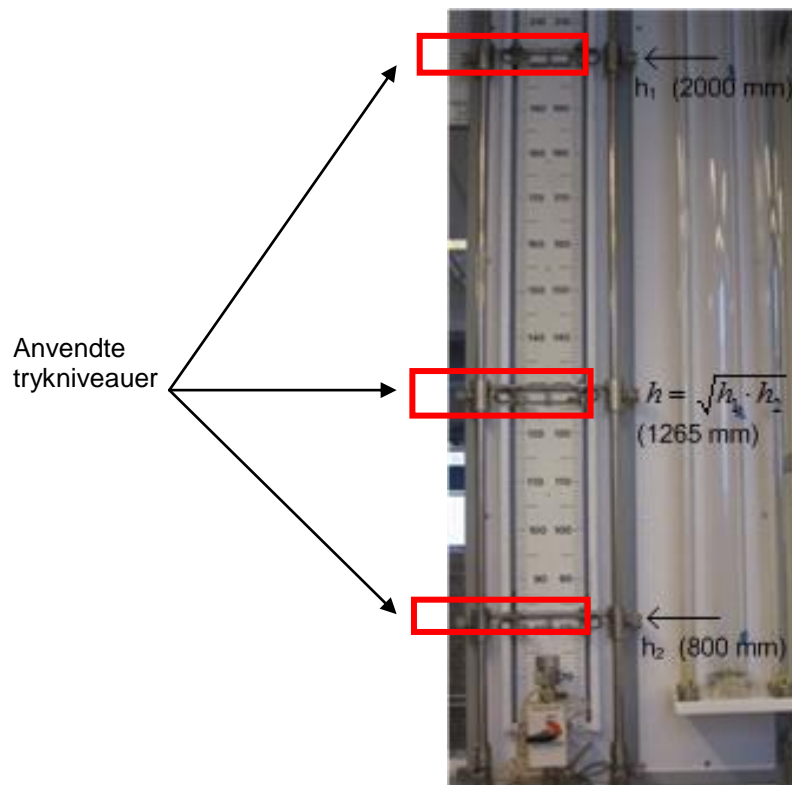


Figur 0.5: Ventiltavle med alle ventiler i lukket position

Ventiler med orange baggrund er vakuumventiler mens ventiler med blå baggrund er vandventiler. Hvis bare én af vakuumventilerne er åben, er det ligeledes nødvendigt at åbne for hovedvacuumventilen, se *Figur 0.5* samt den grønne vacuum pumpe kontakt på styringstavlen, se *Figur 4.3* Alle ventiler skal være i lukkeposition før og efter forsøgsudførelsen.

Standrør og trykniveaumåler

Over permeameteret er standrør og trykniveaumåler placeret. For at kende trykniveauhøjden ved start og slut af strømningsforsøget, måles trykniveauet i tre højder igennem forsøget. **Som standard måles trykniveauet ved hhv. 2000 mm, 1265 mm og 800 mm.** Nulpunktet for trykniveauet er angivet ud fra vandspejlet i overløbsanordningen. De tre trykniveauhøjder kan ses på *Figur 0.6*.



Figur 0.6: Trykniveauer.

Overløbsanordning

For at sikre, at det målte trykniveau er korrekt, er der placeret en overløbsanordning i bundet af permeameterapparatet. Denne skal altid være fyldt helt op med vand. Desuden skal der efter endt forsøg ligges en prop over hullet til overløbsanordningen, således at vandet ikke fordamper. Overløbsanordningen kan ses på *Figur 0.7*.



Figur 0.7: Overløbsanordning.

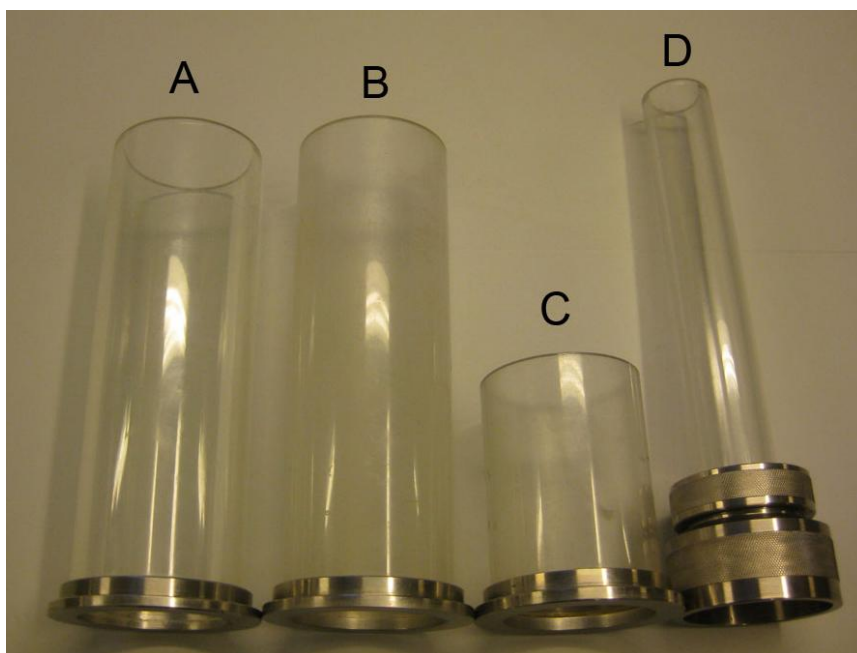
For at sikre, at der ikke kommer vand ind i luftsyste­met, er der i permeameterapparatet indført en sikkerhedsforanstaltning i form af en vandfælde. Vandfælden og ventilen der anvendes til tømning af denne kan ses på *Figur 0.3*.

Valg af permeameter

Der er fire permeameterstørrelser jf. *Tabel 0.1* og *Figur 0.8*.

Tabel 0.1 Størrelse på de fire forskellige permeametre.

Permeameter	Nominel diameter	Længde
nr.	[mm]	[mm]
A	70	200
B	70	200
C	70	70
D	30	210



Figur 0.8: De fire forskellige permeametre.

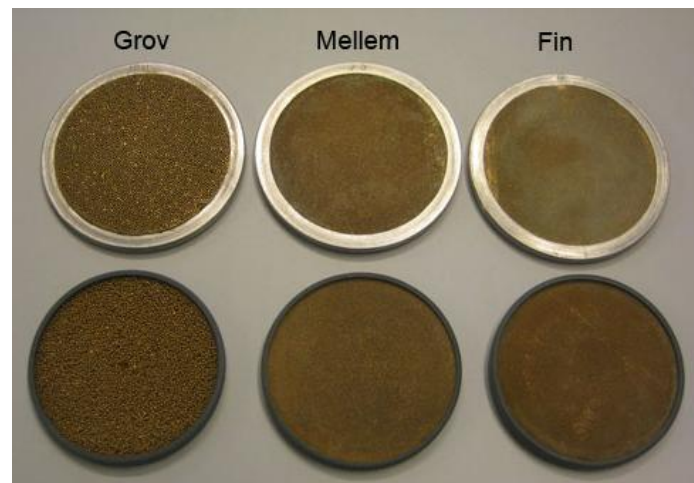
Som standard benyttes permeameter A, B og C. Det er vigtigt, at være opmærksom på om permeameter A eller B anvendes, idet de øverste filtersten er markeret med A og B, og skal passe til det valgte permeameter. Permeameter C kan anvendes i tilfælde af, at der ikke er tilstrækkelig prøvemateriale eller ved en forventet lav permeabilitet. Permeameter D anvendes til intaktprøver hvor prøven optages direkte i permeametret i marken.

Valg af filtersten

I top og bund af permeametre skal placeres filtersten. Der benyttes samme størrelse filtersten i både top og bund. Der er seks sæt filtersten. Disse kan ses i *Tabel 0.2* og *Figur 0.9*.

Tabel 0.2: Størrelse på de forskellige filtersten.

Filtersten	Størrelse [μm]
Grov	100
Grov	60
Mellem	40
Mellem	25
Fin	15
Fin	5



Figur 0.9: De forskellige filterstensstørrelser.

Filtersten vælges svarende til jordprøvens skønnede permeabilitet. Ved valg af for groft et filter vil de fineste korn blive udvasket, hvilket kan ses på vandet. Omvendt vil et for fint filter kunne virke som en membran og påvirke vandgennemstrømningen. Inden det øverste filtersten placeres i permeametre smøres kanten let med siliconefedt.

For at finde den rigtige filtersten laves en kornkurve. Materialet tørres ved 105°C i 24 timer til konstant vægt, hvorefter en sigtning foretages. D_{10} aflæst på kornkurven skal være mindre eller lig med filterstørrelsen.

Valg af fjeder

For fastholdelse af den øverste filtersten skal benyttes en fjeder. Apparatet er udstyret med tre fjedre med forskellige stivheder, se *Figur 0.10*.



Figur 0.10: De tre forskellige fjedre; blød mellem og hård.

Valg af fjeder afhænger af jordens stivhed.

Hvis forsøget udføres som **fast lejring kan der bruges hård eller mellem fjeder**. Jo fastere lejringen er jo hårdere fjeder skal der bruges.

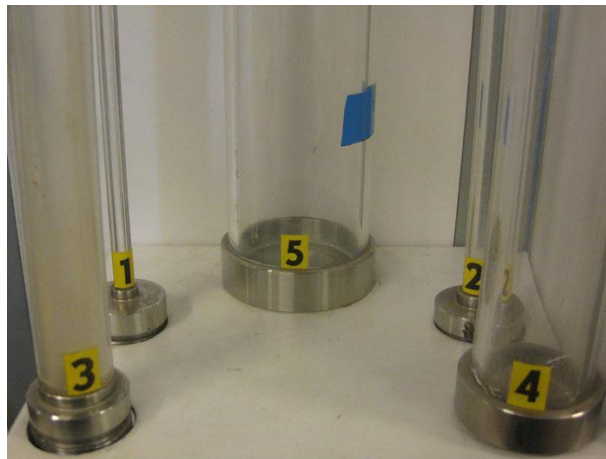
Hvis forsøget udføres som **løs lejring kan der bruges blød eller mellem fjeder**. Jo løsere lejringen er jo blødere fjeder skal der bruges.

Valg af standrør

Der er til apparatet fem forskellige standrør, se *Tabel 0.3* og *Figur 0.11*.

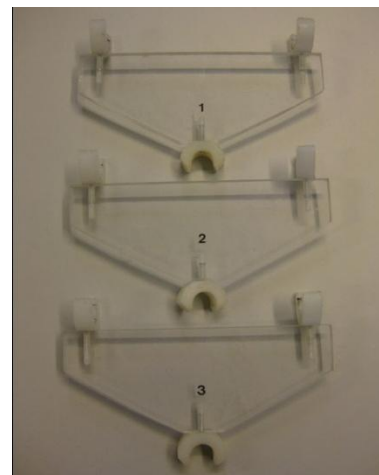
Tabel 0.3: Størrelse på de fem forskellige standrør.

Standrør [nr.]	Nominel diameter [mm]
1	4
2	10
3	20
4	40
5	70



Figur 0.11: De fem forskellige standrør.

Valg af standrør skal tilpasses den enkelte jordprøves forventede permeabilitet.



Figur 0.12: Standrørsholdere til standrør nr. 1.

Ved forventet høj permeabilitet vælges standrør med stor diameter og ved forventet lav permeabilitet vælges standrør med lille diameter. **Sker gennemstrømning på mindre en 2 min. imellem intervallet på hhv. 2000 og**

1265 mm samt intervallet på 1265 og 800 mm skiftes til et standrør med større diameter. Ved anvendelse af standrør nr.1 er det nødvendigt at stabilisere standrøret ved hjælp af holdere der kan ses på *Figur 0.12*.

Forsøgsprocedure

Før forsøget kan igangsættes skal der først gennemføres en række punkter for klargøring af selve permeameteret. Herefter kan selve måleproceduren igangsættes.

En del af klargøringen kan med fordel igangsættes dagen før selve målingen.

Klargøring

I det følgende gives en udførlig beskrivelse af klargøringsproceduren:

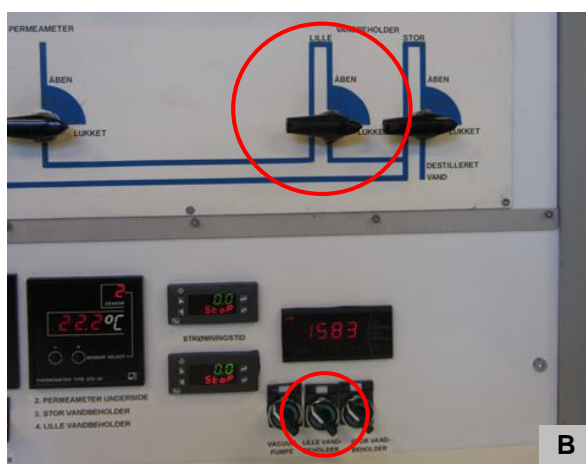
- klargøring af lille og stor vandbeholder
- klargøring af jordprøve og permeameter
- klargøring af forsøgsopstilling

Til punkterne hører en række billedserier.

Klargøring af lille vandbeholder

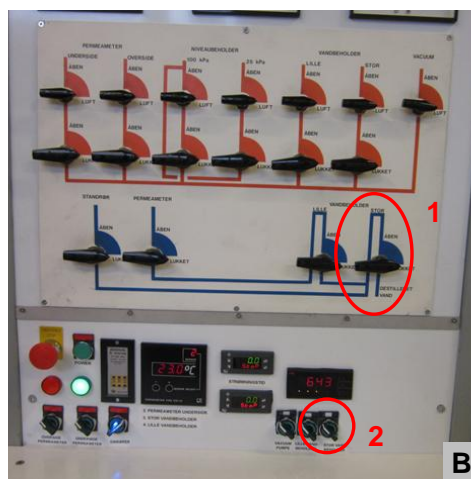
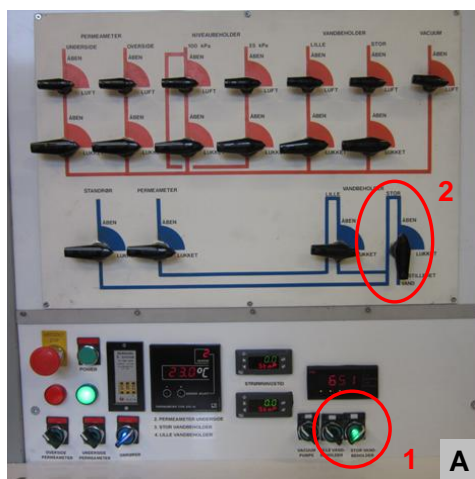
Før forsøgets start, sikres det at *alle* ventiler er lukkede. Den lille vandbeholder fyldes med vand inden klargøring af stor vandbeholder. Vær opmærksom på at den store vandbeholder ikke løber tør imens.

- På styringstavlen tændes der for apparatet ved at trække Emergency stop knappen ud, og trykke på power knappen, jf. Figur 0.4.
- På styringstavlen aktiveres den grønne kontakt til lille vandbeholder hvorefter hanen til lille vandbeholder på ventiltavle aktiveres, (A). Derved føres der vand fra stor til lille vandbeholder. Det er vigtigt at holde øje med, at vandet ikke løber over kanten på den lille vandbeholder i tilfælde af, at micro switch ikke automatisk slår vandtilførslen fra.
- Når den lille vandbeholder er fyldt, lukkes hanen til lille vandbeholder igen hvorefter den grønne kontakt på styringstavlen deaktiveres (B).

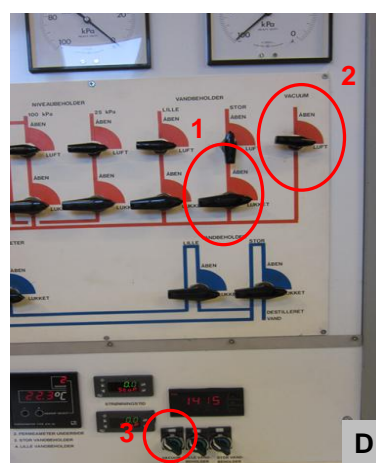
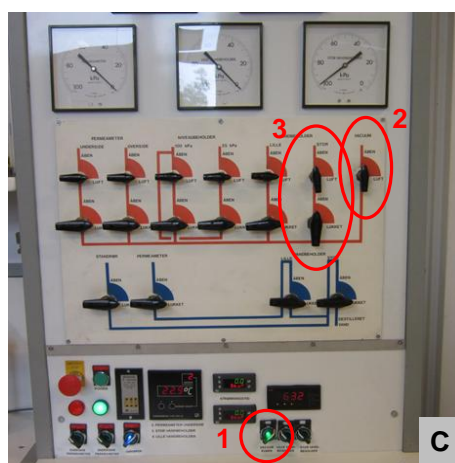


Klargøring af stor vandbeholder

- På styringstavlen aktiveres den grønne kontakt til stor vandbeholder. Derefter åbnes hanen til stor vandbeholder på ventiltavlen (A). Det er vigtigt at holde øje med, at vandet ikke løber over kanten af den store vandbeholder i tilfælde af, at fotocellerne ikke automatisk slår vandtilførslen fra.
- Når den store vandbeholder er fyldt lukkes vandtilførslen ved at lukke hanen til stor vandbeholder på ventiltavlen og efterfølgende deaktivere den grønne kontakt til stor vandbeholder (B).



- Vandet koges ved vacuum i 15 min. ved at aktivere den grønne knap til vacuum pumpen, hvorefter hovedvacuumventilen og vacuumventilerne til stor vandbeholder åbnes (C). Vakuumpumpen må dog ikke være tændt når laboratoriet forlades
- Når vakuum er opnået (~ -100 kPa) og vandet har kogt i 15 min. lukkes den nederste vacuumventil til stor vandbeholder samt hovedvacuumventilen og den grønne knap til vacuum pumpen på styringstavlen (D). Derved koger vandet videre dog i minimum 1,5 timer. Forsøgsopstillingen kan også efterlades på denne måde til at udkoge natten over.
- Når vandet er udkogt lukkes den øverste vacuumventil til stor vandbeholder.
- Herefter åbnes der for vandet til den store vandbeholder. Vandet opvarmes til 28 °C og koges i minimum 8 timer under fuldt vakuum. De 28 °C skyldes, at strømningsforsøget skal udføres med faldende temperatur, og rumtemperaturen i laboratoriet forventes ikke at overstige 28 °C.



Klargøring af jordprøve og permeameter

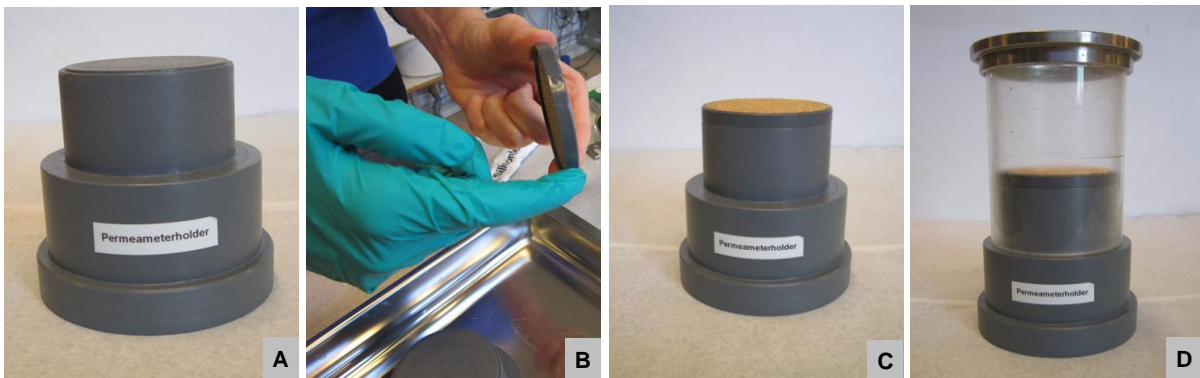
Alle dele der anvendes til samling af permeametret skal før og efter forsøget rengøres grundigt med trykluft. Til samling af permeameter skal anvendes de på *Figur 0.13* viste dele.



Figur 0.13: Dele der skal anvendes til samling af permeameter.

Klargøring af jordprøve og permeameter foregår efter følgende procedure og tilhørende billedeserie.

- Permeameterholderen placeres på bordet (A).
- Kanten af det øverste filter smøres med siliconefedt (kun kanten og ikke selve filteret) (B).
- Det øverste filter placeres på permeameterholderen (C).
- Det tilhørende tomme permeameter placeres over det øverste filter og permeameterholder (D).
- Afvej permeameterholder, permeameter og filter med siliconefedt (D).



- Prøven udlejres (E). Udlejringen kan f.eks. foretages som for løs- og fastlejring af sand. Ved udlejring kan prøven stemples (F). I dette tilfælde opnås en mere homogen pakning af prøven, hvis det øverste lag af prøven ridses efter hver stampning inden der fyldes ekstra prøvemateriale på.
- Den udlejrede prøve i permeameterholder og permeameter vejes.
- Det nederste filter placeres ovenpå den udlejrede prøve (H).



E



F



G



H

- Bundstykke del 1 placeres på det øverste filter (I) hvorefter klemmerne sættes fast (J). Klemmerne skal holde fast omkring kanten på permeameteret som er markeret på (J).
- Hele opstillingen vendes sådan, at bundstykke del 1 er placeret i bunden og permeameterholderen i toppen, hvorefter permeameterholderen fjernes (K).
- Der placeres en fjeder for at fastholde det øverste filter (L).



I



J

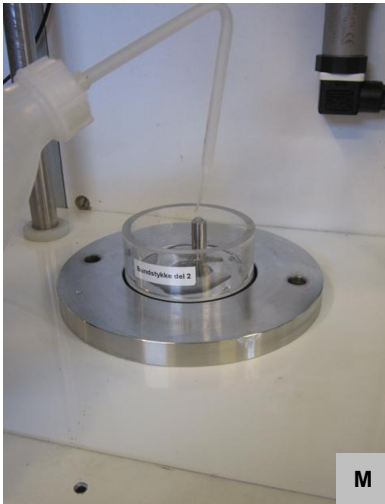


K



L

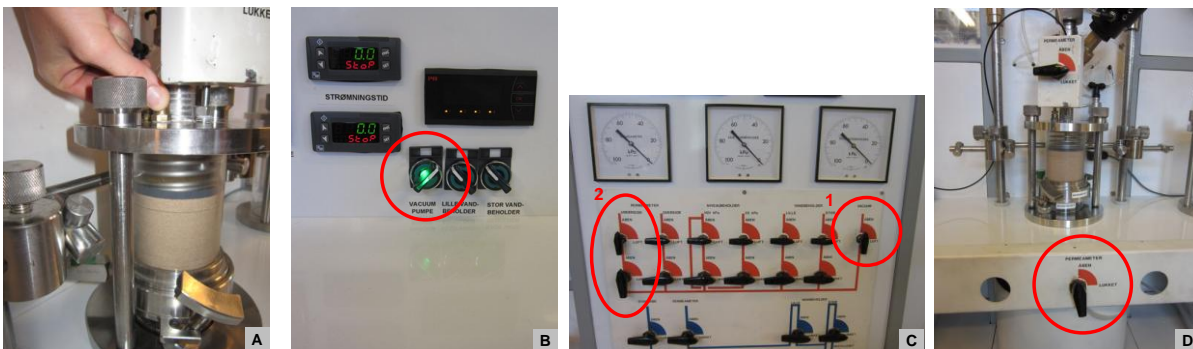
- Bundstykke del 2 placeres i apparatet (M).
- Ventilen der er placeret under bundstykke del 2 gennemskyldes for at fjerne evt. sandkorn (M), og tømmes efterfølgende ved at trykke på den grønne kontakt på styringstavlen "underside permeameter" (N). Ventilen gennemskyldes og tømmes et par gange. Hvor efter kontakter "underside permeameter" igen deaktiveres.
- Permeameteret indsættes i apparatet og det sikres, at kanten i top og bund har ordentlig kontakt (O). Det sikres at klemmer til bundstykke del 1 ikke skærmer for hullerne til de to længe stænger.
- Topstykket i apparatet placeres frit så det hviler på permeameteret (P).
- Permeameteret spændes fast i apparatet ved hjælp af to "lange stænger", der spændes synkront, hvormed skruerne fra bundstykke del 1 sandsynligvis falder af (Q).



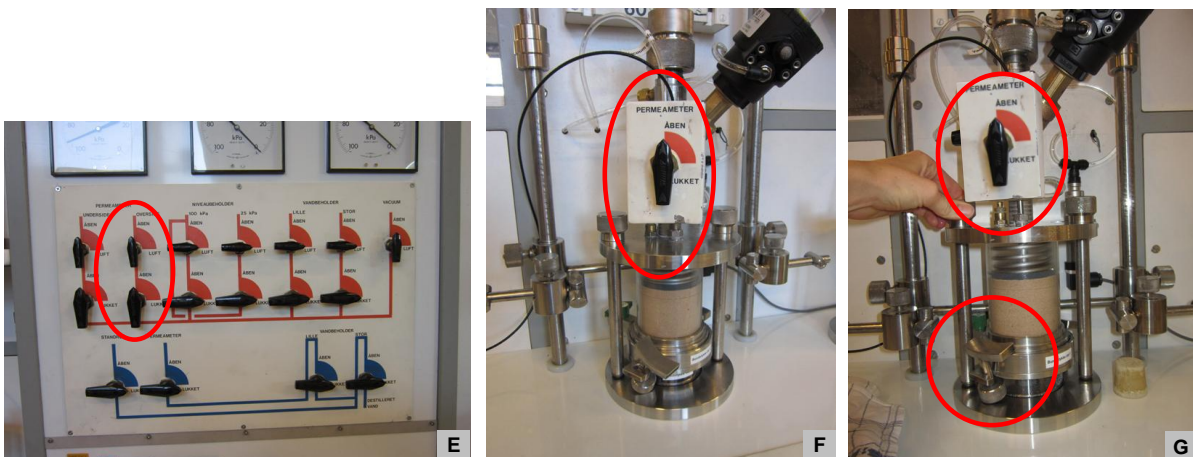
Klargøring af forsøgsopstilling

Når jordprøve og permeameter er indsat i apparatet, kan selve forsøgsopstillingen klargøres. Alle ventiler der åbnes og lukkes, skal åbnes og lukkes med langsom bevægelse. Klargøringen foregår efter følgende procedure og tilhørende billeder.

- Ventilskrue på topstykket af prøve skal være lukket (A).
- Vakuumpumpen tændes, hvis den ikke allerede er tændt (B).
- Det kontrolleres at overløbsanordningen er fyldt med vand, jf. Figur 0.7.
- Først åbnes hovedvakuumentilen og ventilerne "underside permeameter" på ventiltavlen (C), først den nederste hane og derefter den øverste hane. Herefter ventilen under permeameter ved selve permeametret (D).

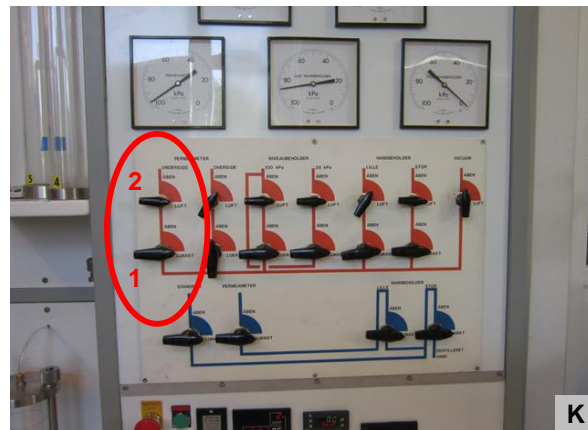
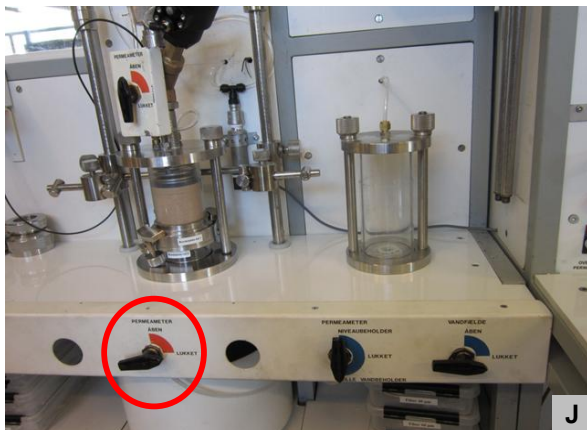
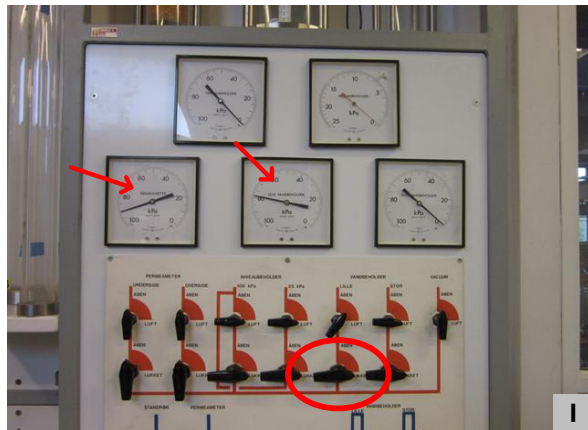
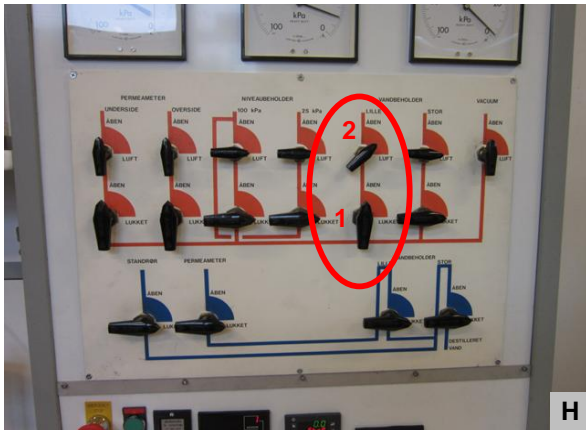


- Derefter åbnes ventilen "overside permeameter" på ventiltavlen (E), igen den nederste hane først og derefter den øverste hane. Herefter ventilen over permeameter ved selve permeametret (F).
- Permeametret efterspændes, så klemmerne falder af hvis ikke de allerede er faldet af (G).



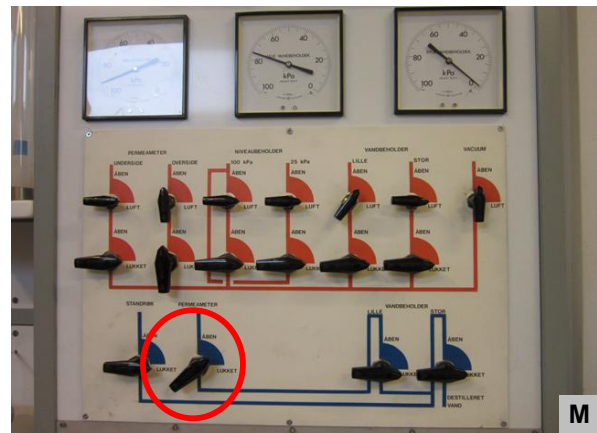
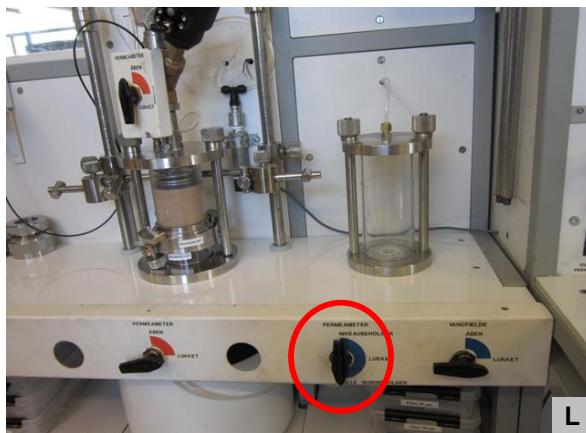
Der påføres minimum 75 kPa vakuum i 2 minutter, dog afhængig af jordprøve og dennes lejring. **Det sikres, at vakuomet ved permeameteret er minimum 5 kPa større end ved den lille vandbeholder, hvilket sikrer at der under vandmætningen ikke kommer vand i luftsystemet.**

- Den nederste vakuumventil på ventiltavlen til lille vandbeholder åbnes helt (H). Den øverste hane åbnes meget forsigtigt, og samtidig sikres det, at vakuum ved den lille vandbeholder altid er 5 kPa lavere end ved permeameteret (H). Når vakuum ved den lille vandbeholder har indstillet sig til minimum 75 kPa, lukkes den nederste vakuumventil til lille vandbeholder (I).
- Efter de 2 min afspærres vakuum ved underside af prøven (J) og dernæst på ventiltavlen – Den nederste vakuumventil lukkes først (K).

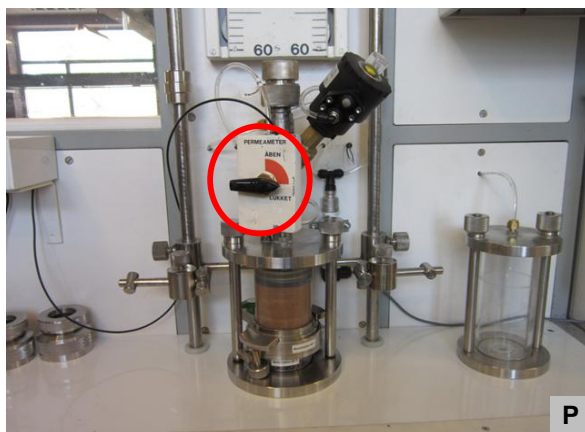
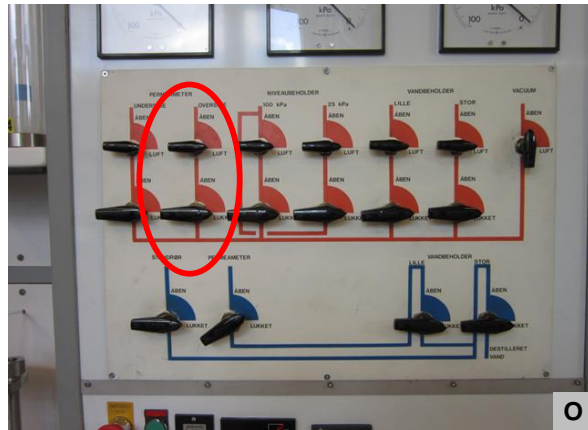
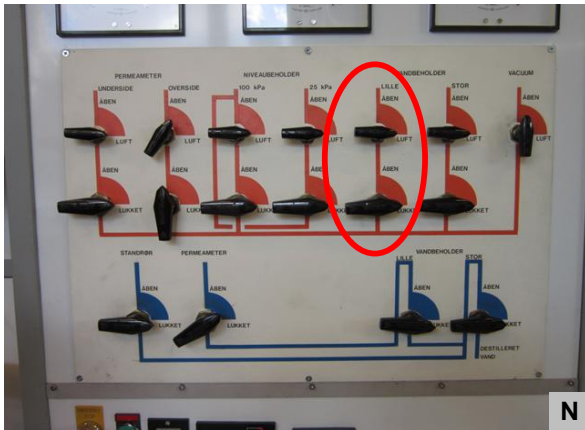


Vandmætningen skal foregå langsomt, ca. en halv time, dog afhængig af jordprøve og lejringstæthed. Hvis der er tale om usorteret materiale som f.eks. stabilgrus kan det være nødvendigt at vandmætningen tager helt op til 1 time.

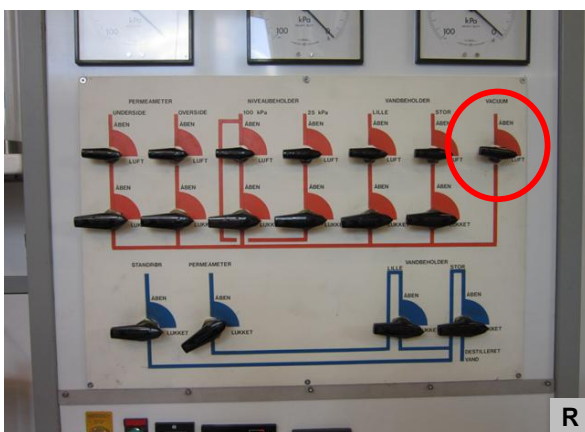
- Tidsforbrug af vandmætning måles og noteres. Vandmætning begynder ved at åbne ventilen til den lille vandbeholder under permeametre nedad (L) og åbne ventilen permeameter ved ventiltavlen forsigtigt (M) samtidig med at der holdes øje med opstigning af vand i bundstykke del 2. Vandmætningen skal foregå langsomt og kan både styres ved regulering af ventil for vand til permeametre ved ventiltavlen samt ved ventilen ved selve permeametre.



- Vandmætningen fortsættes, indtil vandet er ca. 2 cm over øverste filter, hvorefter vakuum til lille vandbeholder afspærres (N). Dernæst afspærres "overside permeameter" på ventiltavlen (først den nederste hane og derefter den øverste hane) samtidig med at der holdes øje med at vandstanden over permeameteret ikke falder (O). Dernæst afspærres "overside permeameter" ved selve permeameteret (P). Det kan være nødvendigt at øge hastigheden for vandtilførelsen på ventilen permeameter når vakuum afspærres.
- Ventilen til atmosfærisk luft åbnes forsigtigt til oversiden af prøven, indtil der strømmer vand ud, hvorefter den lukkes igen (Q).



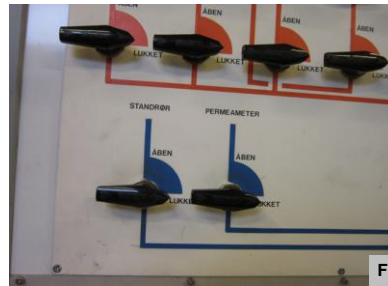
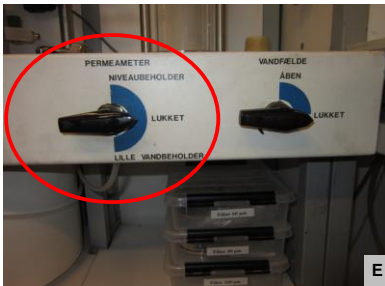
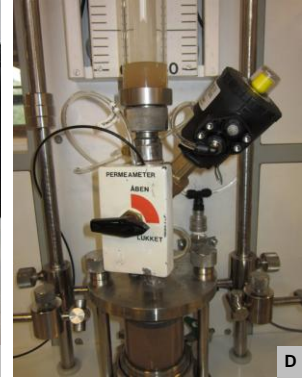
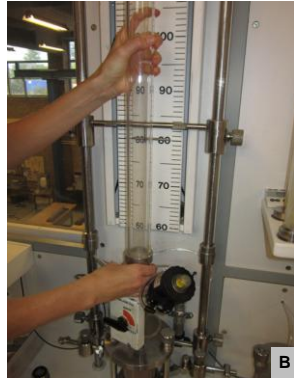
- Hovedvakuumventilen lukkes (R).
- Vakuumpumpe slukkes (S).



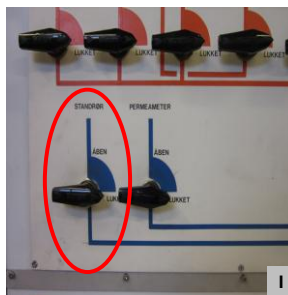
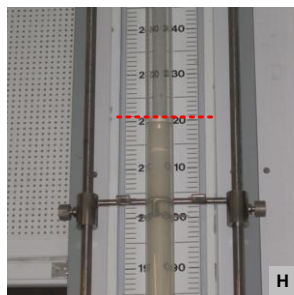
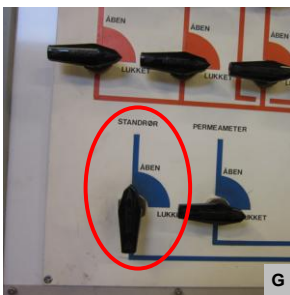
Måleprocedure

Udførelsen af forsøget foregår efter følgende procedure og tilhørende billeder.

- Skru topstykke af permeameter (A).
- Standrør vælges og indsættes i apparatet. Det er også muligt her at ændre størrelse af standrør (B).
- Den grønne kontakt på styringstavlen "overside permeameter" aktiveres (C).
- Der ledes vand op til et par centimeter i standrøret (D) og herefter lukkes ventilen til den lille vandbeholder under permeameteret (E) og ventilen permeameter ved ventiltavlen, (F).



- Der ledes vand i standrøret ved at åbne ventilen standrør ved ventiltavlen (G).
- Permeameteret fyldes til vandet står i standrøret til ca. 20 cm over det øverste trykniveau (H), hvorefter vandtilførelsen afsluttes (I).
- Højden af det udlejrede materiale måles 2 - 3 forskellige steder på prøven (J). (I beregningerne benævnes højden som længden).



- Stopurene nulstilles (K).
- Den grønne kontakt på styringstavlen "underside permeameter" aktiveres, hvorved selve strømningsforsøget startes (L).
- Den grønne kontakt "underside permeameter" deaktiveres igen, når vandspejlet er under nederst trykniveau (M).



- Strømtiden t_1 og t_2 , aflæses på stopurene (N).
- Temperaturen, T_o , over permeametret aflæses (O).
- Temperaturen, T_u , under permeametret aflæses (P).
- Prøvehøjden måles igen 2-3 forskellige steder på prøven



Forsøget gentages minimum 3 gange. Resultatet angives som gennemsnittet af de to sidste forsøg.

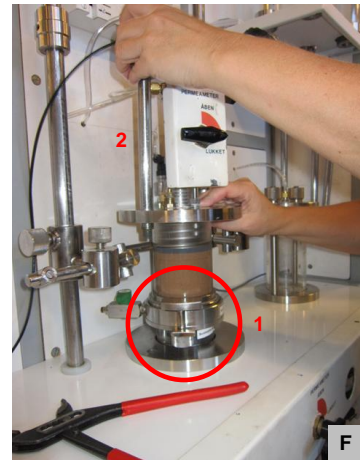
Hvis strømningsiderne, t_1 og t_2 , er ens, og halvdelen af strømningsiden bruges mellem vandspejlsforskellen h_1 og $\sqrt{h_1 \cdot h_2}$ er forsøget lykkedes.

Det er gennemsnittet af de målte prøvehøjder før og efter forsøget der bruges i beregningerne.

- Vand tømmes fra standrør ved at aktivere den grønne kontakt "underside permeameter" (A) til vandet står 0,5 cm over det øverste filter (B). Derefter deaktiveres den grønne knap "underside permeameter" (C).



- Standrør fjernes (D), hvorefter topstykket skrues fast på permeameterholderen for at sikre at denne ikke tørrer ud (E).
- Klemmerne påsættes bundstykke del 1 (F). Disse klemmer sikrer, at jordprøven bliver i permeameteret når permeameteret fjernes fra apparatet. Det er vigtigt at jordprøven tages ud af permeameteret mens jordprøven stadig er vandmættet, da vægten af den vandmættede jordprøve kan anvendes til beregning af mætningsgrad. Permeameter frigøres ved at fjerne de to lange stænger (F) og løsne selve holderen i apparatet.



Efter frigørelse af permeameteret fra Falling Head apparatet er der mulighed for enten at måle poretal eller effektiv porøsitet. Herunder følger en vejledning til begge muligheder.

Måling af mætningsgrad

Det kontrolleres her visuelt om prøve har været vandmættet under forsøget, hvorefter jordprøvens vandindhold, w , bestemmes.

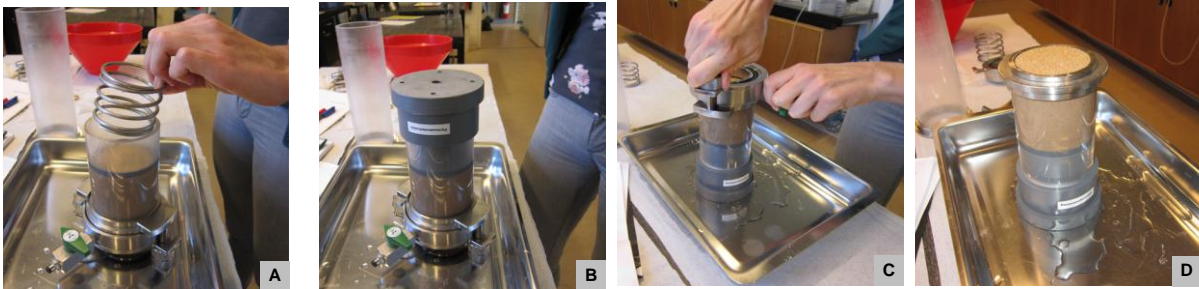
- Den vandmættede jordprøve udtages hurtigt i skål/fad af kendt vægt (m_{sk}) og vejes ($m_{sk} + \text{jordprøve}$). Der kontrolleres visuelt om prøven har været vandmættet under forsøget.
- Den vandmættede jordprøve tørres i tørreskab ved 105° C til konstant vægt.
- Den afkølede skål/fad med den tørrede jordprøve vejes ($m_{sk+tør \text{ jordprøve}}$).

Efter forsøget sikres det at permeameterapparatet og vakuumpumpe er slukket, samt alle ventiler er lukkede.

Måling af effektiv porøsitet

Dette trin udføres i forlængelse af at permeameteret er frigjort fra Falling Head apparatet. Efter klargøring af prøven til måling af effektiv porøsitet placeres den i retentionsboksen. For nærmere beskrivelse af denne henvises der til kapitel 2 i Loll & Moldrup (2000).

- Fjederen fjernes fra permeameteret (A).
- Permeameterholderen isættes permeameteret (B).
- Prøven vendes (C). Klemmer samt bundstykke del 1 fjernes (D).



- Filteret fjernes (E) permeameteret påføres osteklæde ved at fastgøre det med elastikker (F).
- Permeameteret placeres i retentionsboksen til prøven har opnået konstant vægt i ca. 4 dage (G).



Afslutning af forsøg

Efter forsøgets afslutning er det vigtigt at o-ringe mm. rengøres og renses.

- O-ringe udtages af bundstykke del 1, så der kan rengøres for sandkorn og lign. med trykluft
- O-ring ved ventil ved bundstykke del 2 udtages og rengøres ligeledes.
- Alle dele fra Figur 5.1 rengøres og vaskes grundigt.
- Rens filter i ultralydsmaskine i 20 minutter efter endt forsøg.

Bemærkninger

Det anbefales, at der altid sker en indledende vurdering af prøvematerialet ved en kornkurve. Dette giver det bedste grundlag for korrekt valg af filtersten og standrør.

Forsøget skal udføres ved vandmættet prøve. Dette sikres ved at anvende luftfrit demineraliseret vand til både mætning af prøven og til selve strømningsforsøget.

Fotoceller kan være generet af stærkt dagslys, hvorfor det kan være nødvendigt at afdække vinduer helt eller delvist. Alternativt måles strømtiderne med almindeligt stopur.

O-ringene vil med tiden blive hårde, hvorfor de af og til skal skiftes.

Der kan opstå utætheder ved limningen mellem permeameterets plexiglas og stålfatning, hvorfor limningen af og til skal efterses.

Fejlkilder

Det er vigtigt at vandmætningen af prøven foregår langsom. Ved for hurtig tilførsel af vand, vil vandet søge op langs permeameterets yderside og misvisende vil dette kunne tolkes som en tilstrækkelig vandmætning. En langsom vandmætning er også vigtig for at undgå en påvirkning af prøvens lejring.

Forkert valg af filtersten kan have indflydelse på den målte permeabilitet.

Ved jordprøver som silt eller andre finere jordarter skal det kontrolleres, at der ikke magasineres vand i jordprøven, hvormed kontinuitetsligningen ikke er gældende, jf. bilag 0.

Ved grove jordprøver skal det kontrolleres, at der ikke opstår turbulent strømning, hvormed Darcy's lov ikke kan anvendes, jf. bilag 0.

Permeameterets og standrørets areal og volumen kan variere over tværsnittet, hvilket kan introducere en lille fejl på det beregnede poretal, hydraulisk ledningsevne og permeabilitet. I tilfælde af, at de beregnede parametre ønskes bestemt med større nøjagtighed, kan der indføres korrektionsfaktorer på permeameterets volumen og hydraulisk ledningsevne samt på standrørets hydrauliske ledningsevne. Bestemmelsen af de tre korrektionsfaktorer er beskrevet i bilag 0 og 0.

Resultatbehandling

Målte data

Under strømningsforsøget noteres resultater for:

- Tid for vandmætning, T_m
- Prøvens længde, L
- Temperatur over permeametre, T_o
- Temperatur under permeametre, T_u
- Strømtid t_1
- Strømtid t_2
- Masse af skål, m_{sk}
- *Masse af skål og vandmættet jordprøve, $m_{sk + våd jordprøve}$*

Desuden haves kendskab til anvendt permeameterstørrelse, standrør, forskel i trykniveau h_1 og h_2 samt prøvens relative densitet.

Beregninger

Jordprøvens poretal kan beregnes ud fra følgende:

$$e = (1 + w) \frac{d_s \cdot \rho_w \cdot V}{m_{\text{våd jordprøve}}} - 1$$

Hvor

w er jordens vandindhold efter forsøget [rent tal]

d_s er jordkornenes relative densitet [-]

ρ_w er vands densitet [g/cm^3]

$m_{\text{våd jordprøve}}$ er massen af den vandmættede jordprøve [g]

V er volumen af jordprøven [cm^3]

Under strømningsforsøget forudsættes jordprøven, at være vandmættet med en mætningsgrad på $S_w = 1$.

Jordprøvens faktiske mætningsgrad beregnes af:

$$S_w = \frac{w \cdot d_s}{e}$$

Jordprøven regnes som tilstrækkelig vandmættet når $S_w \geq 0,95$.

Jordprøvens hydrauliske ledningsevne ved temperaturen T beregnes af:

$$k_T = \frac{a}{A} \cdot \frac{L}{t_1 + t_2} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

hvor

a er standrørets tværsnitsareal [m^2]

A er jordprøvens tværsnitsareal [m^2]

L er jordprøvens længde [m]

h_1 er forskel i trykniveau, når forsøget starter [m]

h_2 er forskel i trykniveau, når forsøget stopper [m]

t_1 er strømningstiden fra den øverste fotocelle til den midterste [sek.]

t_2 er strømningstiden fra den midterste fotocelle til den nederste [sek.]

En målt hydraulisk ledningsevne ved temperaturen T kan omregnes til en anden temperatur, f.eks. $T = 20^\circ\text{C}$ ved:

$$k_{20^\circ\text{C}} = k_T \cdot \frac{\nu_T}{\nu_{20^\circ\text{C}}}$$

hvor

ν_T er den kinematiske viskositet ved temperaturen T [m^2/s]

$\nu_{20^\circ\text{C}}$ er den kinematiske viskositet ved 20°C [m^2/s]

Herefter kan permeabiliteten beregnes ved:

$$K = k_T \cdot \frac{\nu_T}{g}$$

hvor

g er tyngdeaccelerationen $\approx 9,816$ [m/s^2]

I Tabel 0.4 kan vands kinematiske viskositet og densitet ved forskellige temperaturer aflæses.

Tabel 0.4: Kinematisk viskositet og densitet for vand ved temperatur T .

Temperatur T $^{\circ}\text{C}$	Kinematisk viskositet $\nu_T \cdot 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$	Densitet $\rho_w^T [\text{g}/\text{cm}^3]$
10	1,3070	0,9997
12	1,2360	0,9995
14	1,1700	0,9993
16	1,1100	0,9990
18	1,0540	0,9986
20	1,0040	0,9982
22	0,9569	0,9978
24	0,9135	0,9973
26	0,8732	0,9968
28	0,8358	0,9963

Vurdering af resultater

Jordarters hydrauliske ledningsevne er normalt beliggende i intervallet 10^{-3} til 10^{-10} m/s. For særligt fede lerjordarter kan den hydrauliske ledningsevne dog gå helt ned til 10^{-12} m/s eller mindre.

I Tabel 0.5 er størrelsesordenen for den hydrauliske ledningsevne for en række danske jordarter angivet. $T = 10^{\circ}\text{C}$.

Tabel 0.5: Hydraulisk ledningsevne for nogle danske jordarter.

Jordart	Hydraulisk ledningsevne, k_T [m/s]
Grus	$5 \cdot 10^{-3}$
Groft sand	$1 \cdot 10^{-3}$
Mellemkornet sand	$5 \cdot 10^{-4}$
Ret fint sand	$1 \cdot 10^{-4}$
Fint sand	$5 \cdot 10^{-5}$
Finsand	$2 \cdot 10^{-5}$
Grovsilt	$1 \cdot 10^{-5}$
Silt	$1 \cdot 10^{-6}$
Moræneler	$1 \cdot 10^{-5}$ til $1 \cdot 10^{-7}$
Kalk	$1 \cdot 10^{-3}$ til $1 \cdot 10^{-5}$

Rapportering

Den efterfølgende afrapportering bør indeholde oplysninger hvorledes strømningsforsøget er udført samt forsøgsresultater.

Oplysninger vedr. forsøgsudførelse

- Beskrivelse af prøvemateriale (med eventuel kornkurve)
- Udlejningsmetode af prøvemateriale
- Strømningsforsøget er udført med faldende trykniveau
- Anvendt permeameterstørrelse
- Anvendt filterstenstype
- Diameter og nr. på anvendt standrør
- Jordens relative densitet (skønnet eller bestemt ved forsøg)
- Tid for vandmætning af jordprøve

Forsøgsresultater:

- Vandindhold
- Poretal
- Mætningsgrad
- Hydraulisk ledningsevne ved temperaturen T
- Jordens permeabilitet

Strømningsforsøg – skema

	Nr.
Permeameter	
Filter	
Fjeder	

Relativ densitet d_s		skønnet eller målt
Tid for vandmætning		

Permeabilitet

Standrør nr.			
Standrør diameter nominal d	[cm]		
Standrør areal nominal a	[cm ²]		
Trykniveau højde h_1	[cm]		
Trykniveau højde h_2	[cm]		
Trykniveau højde $\sqrt{h_1 \cdot h_2}$	[cm]		
Prøvens længde, før forsøg L	[cm]		
Prøvens længde, efter forsøg L	[cm]		
Prøvens længde, gennemsnit L	[cm]		
Temperatur T_o	[°C]		
Temperatur T_u	[°C]		
Strømtid t_1	[s]		
Strømtid t_2	[s]		
Hydraulisk ledningsevne $k_T = \frac{a}{A} \cdot \frac{L}{t_1 + t_2} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \cdot 10^{-2}$	k_T [m/s]		
Temperatur (gennemsnittet af T_o og T_u) T	[°C]		
Kinematisk viskositet ν_T	[m ² /s]		
Permeabilitet $K = k_T \cdot \frac{\nu_T}{g}$	K [m ²]		

Vandindhold og poretal

Permeameter diameter nominel	D	[cm]			
Permeameter areal nominel	A	[cm ²]			
Prøve volumen	V	[cm ³]			
Masse af permeameterholder + filter + permeameter		[g]			
Masse af permeameterholder + filter + permeameter + prøve		[g]			
Skål		nr.			
Masse af skål	m_{sk}	[g]			
Masse af skål + våd jordprøve	$m_{sk+våd\ jordprøve}$	[g]			
Masse af jordprøve	$m_{våd\ jordprøve}$	[g]			
Skål ind tørreskab		d. kl.			
Skål ud tørreskab		d. kl.			
Masse af skål + tør jordprøve	$m_{sk+tør\ jordprøve}$	[g]			
Masse af vandindhold	$m_w = m_{sk+våd\ jordprøve} - m_{sk+tør\ jordprøve}$	m_w			
Masse af tør jordprøve	$m_s = m_{sk+tør\ jordprøve} - m_{sk}$	m_s			
Vandindhold $w = \frac{m_w}{m_s}$	w	[rent tal]			
Vandindhold $w = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100\%$	w	[%]			
Poretal $e = (1 + w) \frac{d_s \cdot \rho_w \cdot V}{m_{våd\ jordprøve}} - 1$	e				

Mætningsgrad

$w =$ vandindhold som rent tal			
$S_w = \frac{w \cdot d_s}{e}$	S_w	[-]	

Bemærkninger

Sag:	Boring nr.:	Sag nr.:
Prøven undersøgt d.	Lab. Nr.	Bilag nr.:
Kontr. d.	Godk. d.	

Bilag – Grænsetilfælde

Strømningsforsøget kan udføres på prøver af grus, sand, silt og ler. Ved meget fine eller grove korn skal det kontrolleres, at der ikke magasineres vand i prøven, eller at strømningen ikke overgår til turbulens strømning. De to tilfælde beskrives i det følgende.

Magasinerings af vand i jordprøven

Kontinuitetsligningen er anvendt under forudsætning af, at der ikke magasineres vand i jordprøven. Ved meget fine korn er det derfor nødvendigt at kontrollere, at forudsætningen om dette er gældende. Kontinuitetsligningen kan med god tilnærmelse anvendes uden at tage hensyn til magasinering hvis følgende er gældende:

$$v_v \ll \frac{1+e}{e} \cdot \frac{k_T \cdot E(h_1 - h_2)}{\gamma_w \cdot L^2}$$

Hvor

e er jordprøvens poretal [-]

γ_w er vandets rumvægt [kN/m³]

E er vandets elasticitetskoefficient, $2 \cdot 10^{-6}$ [kN/m²]

v_v er en konstant hastighed som vandspejlet i standrøret tænkes at sænke sig med [m/s]

Ugunstigste tilfælde bliver dermed:

Hydrauliske ledningsevne, k_T , lille

Fald i trykniveau, $h_1 - h_2$, lille

Jordprøvens længde, L , stor

Poretal, e , stor

Hvis det antages at $L = 0,2$ m, $(h_1 - h_2) = 0,2$ m og $e = 0,7$ fås følgende betingelse for hhv. sand og silt:

Sand ($k_T \approx 10^{-4}$ m/s): $v_v \ll 250$ m/s

Silt ($k_T \approx 10^{-8}$ m/s): $v_v \ll 2,5 \cdot 10^{-2}$ m/s

Turbulens strømning

Darcys lov er anvendt under forudsætningen om at strømmingen er laminær. Ved jordprøver af groft sand eller grus kan hastigheden blive så stor, at strømmingen overgår til turbulent strømning, hvormed Darcys lov ikke længere er gældende. Modstanden mod strømmingen bliver en funktion af hastigheden i anden potens, og kan skrives som:

$$i = a \cdot v + b \cdot v^2,$$

hvor

$a \cdot v$ er det laminære led

$b \cdot v^2$ er det turbulente led

For små værdier af v haves $a = 1/k_T$. Turbulensleddet vil være mindre end ca. 10 % af det laminære led når Reynold's tal er mindre end 4:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu} < 4 \quad \text{eller} \quad \text{Re} = \frac{k_T \cdot \frac{h_1}{L} \cdot d}{\nu}$$

hvor

d er jordprøvens middeldiameter [m]

ν er vandets kinematiske viskositet [m^2/s]

Grænsetilfældet for strømningsforsøget med en jordprøve af groft sand bliver dermed følgende:

Hydraulisk ledningsevne $k_T = 10^{-3} \text{ m/s}$

Korndiameter $d_{50} = 0,5 \text{ mm}$

Jordprøvens længe $L = 0,2 \text{ m}$

Kinematiske viskositet $\nu_{20^\circ \text{C}} = 1,004 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Trykniveau $h_1^{\text{max}} = 1,6 \text{ m}$

Hvor Reynold's tal bliver lig 3,98. Ved anvendelse af meget grove jordprøver, er det dermed en nødvendighed at sænke trykniveauet for at undgå, at strømmingen bliver turbulent.

Bilag - Korrektionsfaktorer for permeameter

Hvis der ønskes en meget nøjagtig beregning af poretal, hydraulisk ledningsevne og permeabilitet, kan der indføres korrektionsfaktorer, som tager hensyn til at arealet og volumen af permeametre ikke er konstant langs permeametre.

Poretallet beregnes dermed af:

$$e = (1 + w) \frac{d_s \cdot \rho_w \cdot V_{kor} - 1}{m_{v\ddot{a}djordpr\ddot{o}e}}$$

hvor

V_{kor} er det korrigerede volumen af jordpr\ddot{o}ven. Det korrigerede volumen bestemmes ved at multiplicere det nominelle volumen med en korrektionsfaktor for permeametreets volumen, F_V :

$$V_{kor} = V_{nom} \cdot F_V$$

Korrektionsfaktor p\dd{a} permeametreets volumen, F_V , er givet ved:

$$F_V = \frac{d_{m\ddot{a}lt}^2}{d_{nom}^2} = \frac{V_{m\ddot{a}lt}}{V_{nom}}$$

hvor

$d_{m\ddot{a}lt}$ er permeametreets m\dd{a}lte diameter

d_{nom} er permeametreets nominelle diameter

$V_{m\ddot{a}lt}$ er permeametreets m\dd{a}lte volumen i den m\dd{a}lte pr\dd{o}veh\dd{o}jde

V_{nom} er permeametreets nominelle volumen i den m\dd{a}lte pr\dd{o}veh\dd{o}jde

Den hydrauliske ledningsevne medregnet korrektionsfaktorer bestemmes ved:

$$K_T^{kor} = K_T \cdot F_P \cdot F_S$$

hvor

F_S er en korrektionsfaktor p\dd{a} den hydrauliske ledningsevne for standr\dd{o}ret, jf. bilag 0.

F_P er en korrektionsfaktor p\dd{a} den hydrauliske ledningsevne, for permeametre givet ved:

$$F_P = \frac{1}{F_V}$$

Korrektionsfaktorerne F_V og F_P for permeameter nr.: A fremg\dd{a}r af Tabel 9.

Tabel 0.6: Korrektionsfaktorer for permeameter nr.: A

Permeameter nr.: A				
Prøvehøjde [cm]	$V_{\text{målt}}$ [cm ³]	V_{nom} [cm ³]	F_V	F_p
19,5	759,35	750,45	1,0119	0,9883
19,6	763,34	754,30	1,0120	0,9882
19,7	767,33	758,14	1,0121	0,9880
19,8	771,35	761,99	1,0123	0,9879
19,9	775,42	765,84	1,0125	0,9876
20,0	779,63	769,69	1,0129	0,9873
20,1	783,51	773,54	1,0129	0,9873
20,2	787,53	777,39	1,0130	0,9871
20,3	791,49	781,24	1,0131	0,9870
20,4	795,44	785,08	1,0132	0,9870
20,5	799,29	788,93	1,0131	0,9870

Det målte volume er angivet som middelværdi på 4 målinger.

Korrektionsfaktorerne F_V og F_p for permeameter nr.: B fremgår af Tabel 9.2..

Tabel 0.7: Korrektionsfaktorer for permeameter nr.: B.

Permeameter nr.: B				
Prøvehøjde [cm]	$V_{\text{målt}}$ [cm ³]	V_{nom} [cm ³]	F_V	F_p
19,5	742,52	750,45	0,9894	1,0107
19,6	747,18	754,30	0,9906	1,0095
19,7	753,04	758,14	0,9933	1,0068
19,8	757,63	761,99	0,9943	1,0058
19,9	761,6	765,84	0,9945	1,0056
20,0	763,63	769,69	0,9921	1,0079
20,1	768,48	773,54	0,9935	1,0066
20,2	772,32	777,39	0,9935	1,0066
20,3	776,36	781,24	0,9938	1,0063
20,4	778,73	785,08	0,9919	1,0082
20,5	783,71	788,93	0,9934	1,0067

Det målte volumen er angivet som middelværdi på 5 målinger.

De målte volumener er fundet ved at fylde vand i permeametrene og veje disse.

Bilag - Korrektionsfaktor for standrør

Hvis der ønskes en meget nøjagtig beregning af hydraulisk ledningsevne og permeabilitet, kan der indføres korrektionsfaktorer, som tager hensyn til at arealet og volumen af standrøret ikke er konstant langs standrøret.

Den hydrauliske ledningsevne medregnet korrektionsfaktorer bestemmes ved:

$$K_T^{kor} = K_T \cdot F_P \cdot F_S$$

Hvor

F_P er en korrektionsfaktor på den hydrauliske ledningsevne for permeameteret, jf. bilag0.

F_S er en korrektionsfaktor på den hydrauliske ledningsevne, for standrøret givet ved:

$$F_S = \frac{V_{\text{målt}}}{V_{\text{nom}}}$$

$V_{\text{målt}}$ er standrørets målte volumen inden for det valgte højdeinterval

V_{nom} er standrørets nominelle volumen inden for det valgte højdeinterval

De kalibrerede standrørsvolumener er bestemt inden for intervaller af 100 mm. Ved bestemmelse af korrektionsfaktorer skal der tages hensyn til hvilket interval af standrøret, der benyttes.

Som standard benyttes intervallet mellem 200-80 cm, hvorved korrektionsfaktoren for standrør nr. 3 og en permeameterhøjde på 200 mm er bestemt som:

$$F_S^{200-80} = \frac{V_{\text{mål}}^{80} - V_{\text{mål}}^{200}}{V_{\text{nom}}^{80} - V_{\text{nom}}^{200}} = \frac{560,16 - 147,88}{512,08 - 135,09} = 1,0936$$

Målt og nominel volumen for standrør nr.: 1 for hhv. permeameter med en højde på 70 og 200 mm fremgår af *Tabel 0.8*.

Tabel 0.8: Målt og nominel volumen til beregning af korrektionsfaktor for standrør nr.: 1.

Standrør nr.: 1					
Permeameter med $h = 70$ mm			Permeameter med $h = 200$ mm		
Måleområde [cm]	$V_{\text{målt}}$ [cm ³]	V_{nom} [cm ³]	Måleområde [cm]	$V_{\text{målt}}$ [cm ³]	V_{nom} [cm ³]
230	0,00	0,00	243	0,00	0,00
220	1,39	1,26	240	0,42	0,38
210	2,79	2,51	230	1,81	1,64
200	4,20	3,77	220	3,21	2,89
190	5,61	5,03	210	4,62	4,15
180	7,01	6,28	200	6,03	5,41
170	8,41	7,54	190	7,43	6,66
160	9,81	8,80	180	8,83	7,92
150	11,20	10,05	170	10,23	9,18
140	12,62	11,31	160	11,63	10,43
130	14,06	12,57	150	13,05	11,69
120	15,50	13,82	140	14,49	12,95
110	16,95	15,08	130	15,94	14,20
100	18,40	16,34	120	17,39	15,46
90	19,84	17,59	110	18,83	16,72
80	21,28	18,85	100	20,27	17,97
70	22,71	20,11	90	21,71	19,23
60	24,14	21,36	80	23,14	20,49
			73	24,14	21,36

Det målte volumen er angivet som middelværdi på 3 målinger.

Målt og nominel volumen for standrør nr.: 3 for hhv. permeameter med en højde på 70 og 200 mm kan ses i Tabel 0.9.

Tabel 0.9: Målt og nominal volumen til beregning af korrektionsfaktor for standrør nr.: 3.

Standrør nr.: 3					
Permeameter med $h = 70$ mm			Permeameter med $h = 200$ mm		
Måleområde [cm]	$V_{\text{målt}}$ [cm ³]	V_{nom} [cm ³]	Måleområde [cm]	$V_{\text{målt}}$ [cm ³]	V_{nom} [cm ³]
230	0,00	0,00	243	0,00	0,00
220	34,26	31,42	240	10,28	9,43
210	68,58	62,83	230	44,56	40,84
200	103,09	94,25	220	78,93	72,26
190	137,59	125,66	210	113,44	103,67
180	171,90	157,08	200	147,88	135,09
170	206,33	188,50	190	182,23	166,51
160	240,90	219,91	180	216,70	197,92
150	275,33	251,33	170	251,23	229,34
140	309,68	282,74	160	285,64	260,75
130	344,10	314,16	150	320,01	292,17
120	378,48	345,58	140	354,41	323,59
110	412,61	376,99	130	388,72	355,00
100	446,80	408,41	120	422,87	386,42
90	481,14	439,82	110	457,10	417,83
80	515,45	471,24	100	491,43	449,25
70	549,84	502,65	90	525,77	480,66
60	584,23	534,07	80	560,16	512,08
			73	584,23	534,07

Det målte volumen er angivet som middelværdi på 3 målinger.

De målte volumener er fundet ved at fylde vand i standrørene og veje disse.

Referencer

Lund, Willy, Møldrup, Per, Sørensen, Kirsten B., (1992). Bestemmelse af jords mættede hydrauliske ledningsevne og sorpitet, Aalborg Universitet, Artikel til NGM-92

Lund, Willy, Jakobsen K.P., (1998), Permeability Tests on Silkeborg Sand N0. 0000, Laboratory testing paper no. 21, Aalborg University

Lund, Willy, (1989), Notat om strømningsforsøg med faldende trykniveau, Aalborg Universitet

Loll, Per, Møldrup, Per, (2000). Soil Characterization and Polluted Soil Assessment, M.Sc. Course, Aalborg University

